

УДК 536.248

Д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО¹, Р. С. МЕЛЬНИК¹, к. т. н. А. И. РУДЕНКО¹,
к. т. н. С. М. РОТНЕР²

¹Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»;
г. Одесса, ²ТОВ СП «ЛАЭТ»
E-mail: yunikola@ukr.net

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИМИТАТОРА ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК

Описаны особенности конструкции и технологии изготовления объемного разъемного имитатора теплового потока, предназначенного для исследования тепловых характеристик и проведения тепловых испытаний тепловых труб систем охлаждения электронной аппаратуры. В качестве нагревательных элементов имитатора используются тонкие пластинки из алюмооксидной керамики с нанесенными на них алмазоподобными пленками. Приведены результаты экспериментального исследования температуры поверхности нагревательных элементов и перепада температуры между нагревательными элементами и тепловой трубой в области значений подводимого теплового потока от 5 до 25 Вт. Использование предложенного имитатора теплового потока позволяет ускорить процесс исследования и испытания тепловых труб.

Ключевые слова: имитатор теплового потока, алмазоподобная пленка, температура нагревательного элемента, тепловая труба.

Тепловые трубы (ТТ) являются высокоэффективными теплопередающими устройствами систем охлаждения электронной аппаратуры [1—4]. Испытания тепловых труб на соответствие заданным тепловым характеристикам, а также постоянное развитие и совершенствование ТТ требуют использования теплофизических методов контроля и проведения экспериментальных исследований по определению основных тепловых характеристик ТТ, таких как термическое сопротивление, максимальный передаваемый тепловой поток, перепад температуры по ТТ, температура в зоне теплоподвода ТТ при заданном уровне подводимого теплового потока и т. п. При проведении таких исследований к ТТ необходимо подводить определенный, заранее заданный, тепловой поток, эквивалентный тому, что выделяется электронным устройством или компонентом, для охлаждения которого предназначена ТТ. С этой целью используются разные методы нагрева и имитаторы теплового потока: радиационные, контактные, омические, индуктивные, электронные, циркулирующим теплоносителем, и т. п. [5, с. 72—76].

Наиболее часто для подвода тепла к ТТ используются электрические резистивные имитаторы теплового потока (ИТП) в виде проволоки или ленты из материала с высоким удельным электрическим сопротивлением, например из нихрома, намотанной вокруг зоны теплоподвода ТТ [6—10]. Так, авторы [6, 7] при исследовании стеклянных пульсационных ТТ использовали имитаторы теплового потока, выполненные в виде проволоки из высокоомного материала, намотанной непосредственно на стеклянный корпус ТТ в зоне теплоподвода длиной 100 и 30 мм соответственно. Расстояние между витками проволоки в несколько раз превышало ее диаметр, что позволяло визуально наблюдать за протеканием теплогидродинамических процессов в ТТ. Такой ИТП отличается максимальной простотой, однако его конструкция является неразъемной, что не позволяет использовать его для исследования других тепловых труб. В исследованиях [8] применяли ИТП, выполненный в виде ленты из материала с высоким удельным электрическим сопротивлением, которую наматывали с переменным шагом вокруг зоны теплоподвода длиной 90 мм стеклянного термосифона диаметром 12 мм. Имитатор позволял создавать тепловой поток в диапазоне от 10 до 50 Вт. Общим недостатком всех рассмотренных ИТП является их непригодность для подвода теплового потока к ТТ из электропроводного материала, например из металла. В таких случаях используют ИТП из

проволоки с электроизоляцией, выдерживающей высокую температуру [9], или же на поверхность ТТ в зоне теплоподвода наносят слой электроизоляционной стеклоленты, на который плотно наматывается нихромовая спираль [10]. Такие конструкции, однако, не позволяют легко переустанавливать ИТП с одного участка ТТ на другой или же на другую ТТ.

Известны также имитаторы теплового потока, представляющие собой металлическое теплопроводное основание той или иной формы, на которое через электроизоляционный слой наматывается ленточный нагревательный элемент [11], или же основание с вмонтированными картриджами из нагревательных элементов [12]. В первом случае максимальный тепловой поток, создаваемый ИТП с латунным цилиндрическим основанием, охватывающим термосифон, составляет 300 Вт [11], во втором ИТП с пятью цилиндрическими нагревательными картриджами, впаянными в медный блок с размерами контактной поверхности 25×25 мм — 628 Вт [12]. При этом максимальное значение плотности теплового потока составляет 100 Вт/см².

Перспективными являются имитаторы теплового потока, нагревательные элементы которых выполнены из легированных алмазоподобных пленок. В зависимости от свойств, которые необходимо придать резистивному покрытию, в качестве легирующего металла используют, например, хром, вольфрам, титан и др. Благодаря структуре алмазоподобной пленки, резистивное покрытие таких нагревательных элементов обладает стабильным электрическим сопротивлением при эксплуатационной термостойкости более 500°С, плотности электрического тока выше $2 \cdot 10^5$ А/см² и температурном коэффициенте сопротивления менее 10⁻⁴ 1/К [13].

Известный ИТП на основе алмазоподобной пленки [14] представляет собой подкладку из теплопроводной керамики толщиной 0,2—2,0 мм, на поверхности которой расположен резистивный нагревательный элемент, выполненный из легированной алмазоподобной пленки толщиной 0,2—2,5 мкм, с контактными площадками на концах. При этом, однако, ИТП с плоской контактной поверхностью трудно использовать для подвода теплового потока к ТТ цилиндрической формы. Для решения данной проблемы в [15] был разработан имитатор теплового потока, представляющий собой металлическое основание цилиндрической формы с нанесенными на его поверхность слоем керамики и легированной алмазоподобной пленкой с контактными площадками. В основании имеется сквозное отверстие, позволяющее устанавливать его на ТТ цилиндрической формы, надвигая на ТТ. При этом для обеспечения достаточно плотного соединения ИТП и ТТ желательно, чтобы зазор между стенками отверстия и ТТ был минимальным, однако осуществить это на практике чаще всего невозможно по следующей причине. Вакуумноплотную герметизацию торцов корпуса ТТ из алюминия и его сплавов выполняют преимущественно привариванием торцевого донышка-заглушки и донышка с заправочной трубкой к корпусу ТТ аргонодуговой сваркой. При этом сварной шов, как правило, имеет наплывы металла высотой 1—3 мм (**рис. 1**), снимать которые механическим путем не рекомендуется, чтобы не открыть возможные скрытые микропоры в теле сварного шва и не нарушить герметизацию ТТ. Очевидно, что в таком случае при установке имитатора теплового потока на ТТ зазор между ними будет не меньше 1—3 мм, что является недопустимым с точки зрения обеспечения передачи теплоты от ИТП к ТТ с минимальным контактным термическим сопротивлением.

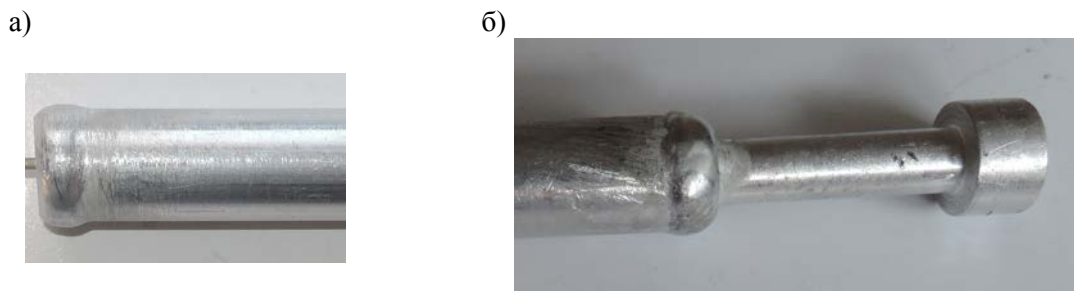


Рис. 1. Внешний вид сварных швов в зоне герметизации ТТ со стороны доньшка-заглушки (а) и со стороны доньшка с заправочной трубкой (б)

В настоящей работе предложен имитатор теплового потока на основе алмазоподобных пленок, конструкция которого позволяет устанавливать его с минимальным зазором на цилиндрическую ТТ (или термосифон) с наплывами металла в местах сварки, а также легко переустанавливать с одного участка ТТ на другой или же на другую ТТ в процессе исследований.

Конструкция и технологические особенности изготовления имитатора теплового потока

Рассмотрим особенности предложенной новой конструкции имитатора теплового потока на основе алмазоподобных пленок [16], представленной на **рис. 2**.

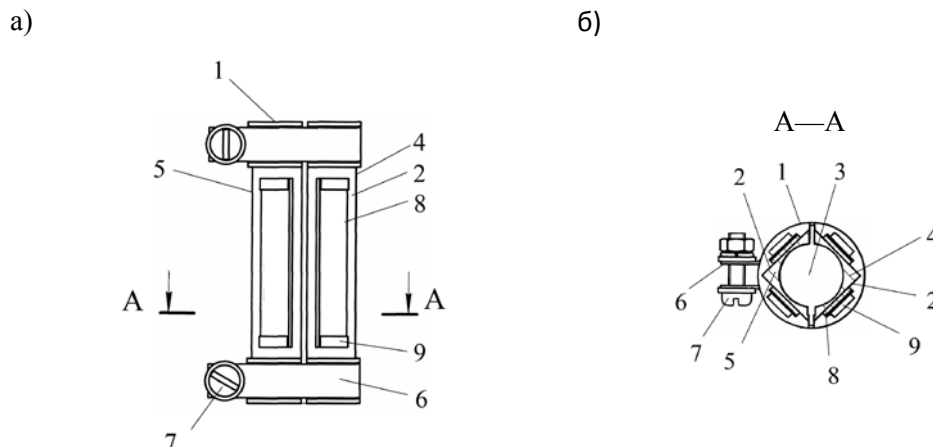


Рис. 2. Конструкция имитатора теплового потока:

а — общий вид; б — поперечный разрез

Основание 1 ИТП представляет собой отрезок трубы из теплопроводного материала (например, алюминия или его сплавов) с четырьмя (или более) плоскими гранями 2 на внешней поверхности и цилиндрическим отверстием 3, которое предназначено для размещения ТТ. Основание состоит из двух частей 4 и 5, которые соединяют с помощью стягивающих хомутов 6 с крепежными элементами 7 (винтами, шайбами и гайками). На гранях основания с обеспечением теплового контакта расположены плоские нагревательные элементы 8 (по меньшей мере два на каждой грани) на основе легированных алмазоподобных пленок с контактными площадками 9, предназначенными для электрического соединения элементов между собой и для подключения к источнику питания.

Технологию изготовления имитатора теплового потока предложенной конструкции рассмотрим на примере экспериментального образца ИТП (рис. 3), предназначенного для подвода теплового потока к ТТ диаметром 12 мм системы охлаждения светодиодного модуля [17].

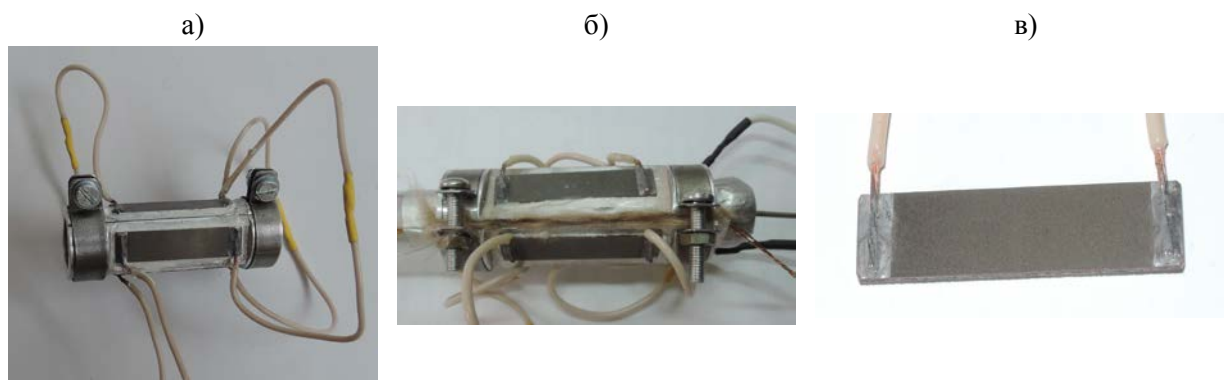


Рис. 3. Внешний вид имитатора теплового потока до установки (а) и установленного на ТТ (б), а также нагревательный элемент на основе алмазоподобной пленки (в)

Заготовку разъемного основания ИТП изготавливали из отрезка стандартной трубы с внутренним диаметром 12 мм, внешним диаметром 20 мм. Материал — алюминиевый сплав АД31Т. Плоские грани размером 34×13 мм на заготовке основания выполняли фрезерованием, а канавки глубиной 0,5 мм и шириной 6,4 мм для стягивающих хомутов (из стальной ленты толщиной 0,5 мм) — точением. После этого заготовку разрезали вдоль оси на две одинаковые части дисковой фрезой толщиной 1 мм. На внутренней поверхности каждой части фрезерованием выполняли по одной продольной канавке шириной 1 мм и глубиной 1,5 мм для прокладки в ней термопар для зоны теплоподвода ТТ.

Нагревательные элементы (рис. 3, в) изготавливали в СП «ЛАЭТ», г. Одесса. Легированную алмазоподобную пленку и контактные площадки наносили методом вакуумного плазменного осаждения на крупногабаритную керамическую подложку толщиной 1 мм из алюмооксидной керамики ВК-94 в соответствии с разработанной на этом предприятии групповой технологией [13]. Подложку с нанесенной алмазоподобной пленкой разрезали на отдельные нагревательные элементы размерами 7×30×1 мм путем лазерного скрайбирования и резки на специализированном лазерном оборудовании.

Для обеспечения теплового контакта нагревательные элементы с припаянными к контактными площадкам соединительными проводами приклеивали к поверхности плоских граней основания с помощью эластичного силиконового компаунда типа RTV-904.

Методика использования имитатора теплового потока и результаты исследования его тепловых характеристик

Для проведения экспериментальных исследований тепловых характеристик или тепловых испытаний ТТ с использованием созданного разъемного имитатора теплового потока обе его части с закрепленными нагревательными элементами устанавливают на зону теплоподвода вокруг ТТ и плотно стягивают между собой ТТ с помощью хомутов и крепежных деталей. Для уменьшения контактного термического сопротивления контактные поверхности ТТ и частей разъемного основания имитатора предварительно смазывают теплопроводной пастой типа КПТ-8. Для имитации теплового потока, эквивалентного тепловому потоку охлаждаемого электронного устройства, на нагревательные элементы ИТП с помощью

регулятора напряжения подают контролируемое значение мощности. Для исключения теплопотерь в окружающую среду весь обогреваемый участок ТТ с имитатором теплового потока теплоизолируют слоем базальтового материала и помещают в стеклянную колбу с вакуумированными полыми стенками.

Тепловой поток, выделяемый в нагревательных элементах при подаче на них питающего напряжения, передается через слой эластичного компаунда между основанием имитатора и контактными поверхностями нагревательного элемента к алюминиевому основанию ИТП, а от него через слой пасты КПП-8 к зоне теплоподвода ТТ. Благодаря эффективной передаче теплоты внутри ТТ в замкнутом испарительно-конденсационном цикле теплоносителя тепловой поток передается к зоне теплоотвода ТТ и отводится от нее путем естественной или вынужденной конвекции воздуха или жидкости, в зависимости от заданных условий охлаждения.

Экспериментальные исследования тепловых характеристик созданного образца имитатора теплового потока проводились на экспериментальной установке, описанной в [16]. В экспериментах использовалась алюминиевая тепловая труба с резьбовой капиллярной структурой, предназначенная для охлаждения светодиодного модуля с мощностью P в диапазоне от 5 до 25 Вт. Размеры изготовленного имитатора теплового потока соответствовали размерам светодиодного модуля. Диаметр ТТ 12 мм, длина 830 мм, длина зоны теплоподвода 50 мм, в качестве теплоносителя использовали хладон 141b. Отвод теплоты от зоны конденсации ТТ осуществлялся естественной конвекцией воздуха при температуре $t_{oc} = 24,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Расположение ТТ — вертикальное, зона теплоподвода — внизу.

В процессе экспериментальных исследований определялись температура нагревательных элементов $t_{HЭ}$ и разность температур Δt между нагревательными элементами и тепловой трубой при значениях теплового потока $P = 5\text{—}25$ Вт.

Температура каждого нагревательного элемента измерялась с помощью термопары, установленной в центре поверхности алмазоподобной пленки. Спаи термопар были электрически изолированы от электропроводящих поверхностей с помощью липкой тонкой стеклотенты. Температура на поверхности ТТ в зоне теплоподвода измерялась четырьмя термопарами.

На **рис. 4** представлены измеренные значения температуры нагревательных элементов $t_{HЭ}$ экспериментального образца ИТП в диапазоне изменения подводимого теплового потока P от 5 до 25 Вт. Здесь видно, что зависимость $t_{HЭ}(P)$ является линейной, а при $P = \text{const}$ значения температуры нагревательных элементов различаются не более чем на 5°C . Так, например, при $P = 25$ Вт максимальное значение температуры, равное $120,6^\circ\text{C}$, имеет нагревательный элемент № 3, минимальное — $115,6^\circ\text{C}$ — элемент № 1. Это свидетельствует об идентичности значений контактного термического сопротивления между нагревательными элементами и основанием ИТП, а также между основанием и ТТ. Достаточно низкое значение температуры ИТП — не более $120,6^\circ\text{C}$ — достигается благодаря хорошим условиям отвода теплоты от алмазоподобной пленки нагревательных элементов, что в свою очередь обеспечивается за счет хорошего теплового контакта плоских поверхностей между собой. Это облегчает условия теплоизоляции нагретых поверхностей при использовании имитатора теплового потока в процессе исследований и испытаний ТТ.

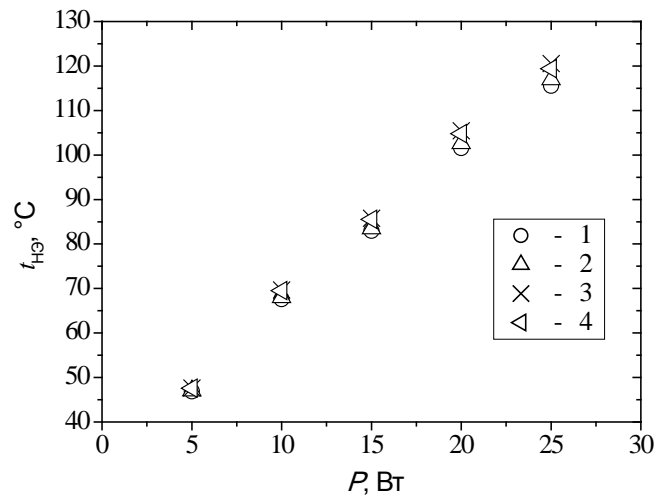


Рис. 4. Зависимость температуры нагревательных элементов (1—4) от теплового потока имитатора

На рис. 5 представлена зависимость разности Δt между средними значениями температуры нагревательных элементов ($t_{HЭcp}$) и температуры в зоне теплоподвода ТТ от величины подводимого теплового потока P . Как видно из рисунка, при увеличении P от 5 до 25 Вт значение Δt возрастает от 3,2 до 12,0°C. При этом температура $t_{HЭcp}$ изменяется от 47,3 до 118,1°C, а разность между $t_{HЭcp}$ и температурой окружающей среды ($t_{OC} = 24^\circ\text{C}$), соответственно, — от 23,3 до 94,1°C. Таким образом, вклад разности Δt между температурами ИТП и ТТ в общий перепад температуры в системе охлаждения составляет около 13%, что свидетельствует о достаточно низком общем термическом сопротивлении ИТП на основе алмазоподобной пленки (0,64—0,48 °C/Вт) и возможности использования его при исследовании тепловых характеристик ТТ.

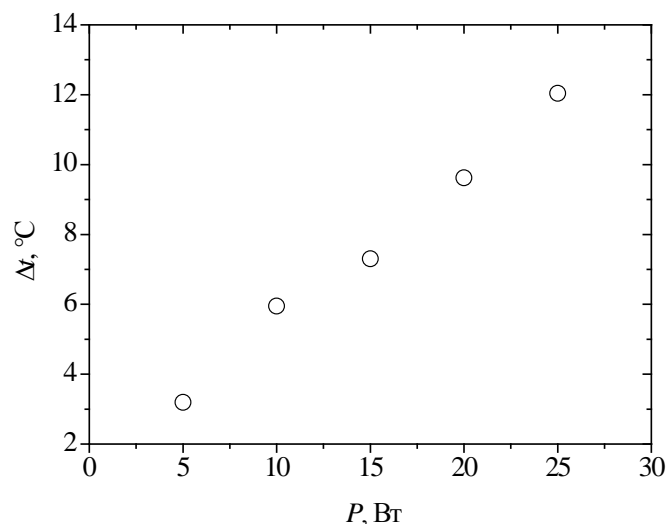


Рис. 5. Зависимость разности температур нагревательных элементов и тепловой трубы от подводимого теплового потока при $t_{OC} = 24^\circ\text{C}$

Выводы

Предложенная конструкция имитатора теплового потока на основе алмазоподобных пленок предназначена для проведения экспериментальных исследований тепловых характеристик и тепловых испытаний тепловых труб. Выполнение имитатора разъемным позволяет устанавливать его на цилиндрическую тепловую трубу с напылами металла в области сварных швов на ее концах, обеспечивая при этом их надежный механический и тепловой контакт. Такой имитатор в процессе исследований можно легко переустанавливать с одного участка ТТ на другой или же на другую ТТ. Будучи достаточно компактной, конструкция имитатора позволяет получать значительные тепловые потоки. Так, например, при длине экспериментального образца 50 мм, диаметре отверстия в его основании 12 мм и использовании четырех нагревательных элементов размером 7×30×1 мм на основе алмазоподобной пленки с общим электрическим сопротивлением 60 Ом при подключении к регулируемому источнику питания с напряжением на выходе до 220 В обеспечивается тепловой поток до 806,67 Вт.

Благодаря указанным особенностям, предложенная конструкция имитатора теплового потока имеет более широкие эксплуатационные возможности по сравнению с существующими аналогами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хайрнасов С. М. Применение тепловых труб в системах обеспечения тепловых режимов РЭА: современное состояние и перспективы // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2015.— № 2-3.— С. 19—33. <https://doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.19>
2. Батуркин В.М., Николаенко Ю.Е., Галютдинов Д.М., Владимиров И.Т. Эффективное охлаждение мощного сверхвысокочастотного микроэлектронного блока // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2007.— № 3.— С. 46—50.
3. Masataka Mochizuki et al. A review of heat pipe application including new opportunities // *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*.— 2011.— Vol. 2, 013001.— P. 1—15. <https://doi.org/10.5098/fhp.v2.1.3001>
4. Николаенко Ю.Е. и др. Пути снижения температуры кристалла светодиода в составе люстры с алюминиевыми тепловыми трубами // *Трубы XV МНПК "Современные информационные и электронные технологии"*.— 2014.— Т. II.— Украина, Одесса.— С. 24—25. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/17475>
5. Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Чулков Б.А., Ягодкин И. В. *Технологические основы тепловых труб*.— Москва: Атомиздат, 1980.
6. Zhi Hu Xue, Wei Qu. Experimental and theoretical research on a ammonia pulsating heat pipe: New full visualization of flow pattern and operating mechanism study // *International Journal of Heat and Mass Transfer*.—2017.— Vol. 106.— P. 149—166. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.042>
7. Алексеик Е.С., Кравец В.Ю. Влияние количества витков на теплопередающие характеристики пульсационных тепловых труб // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий, серия: Энергосберегающие технологии и оборудование*, 2010.— Вып. 6/7 (48).— С. 59—63.
8. L.A. Asirvatham, S. Wongwises, J. Babu. Heat transfer performance of a glass thermosyphon using graphene-acetone nanofluid // *Journal of Heat Transfer*.— 2015.— Vol. 137.— P. 111502-1—111502-9. <https://doi.org/10.1115/1.4030479>
9. L. Vasiliev Jr., M. Rabetsky, A. Kulakov, L. Vasiliev, Z. M. Li. An advanced miniature copper heat pipes development for cooling system of mobile PC platform // *Proc. of the VII Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources"*.— 2008.— Minsk, Belarus.—2008.—Vol. 1.— P. 336—344. https://www.researchgate.net/publication/255790604_An_advanced_miniature_copper_heat_pipes_development_for_cooling_system_of_mobile_PC_platform
10. Хайрнасов С.М., Рассмакин Б.М., Алексеик Е.С., Анісімова А.А. Робочі характеристики алюмінієвих термосифонів для комбінованого сонячного колектора // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*.— 2014.— № 6.— С. 42—48.
11. Hussam Jouhara, Anthony J. Robinson. Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283 // *Applied Thermal Engineering*.— 2010.— Vol. 30.— P. 201—211. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.08.007>
12. Ji Li, Daming Wang, and G. P. "Bud" Peterson. A Compact Loop Heat Pipe With Flat Square Evaporator for High Power Chip Cooling // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*.— 2001.— Vol. 1, N 4.— P. 519—527. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2010.2099531>

При ссылке на нее используйте, пожалуйста, следующее: Yu. E. Nikolaenko, R. S. Melnyk, A. I. Rudenko, S. M. Rotner. Constructive and technological aspects of the heat flow imitator based on diamond-like films. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2017, no 6, pp. 29-33

13. Патент № 67527 А України. Спосіб отримання резистивного покриття // С.М. Ротнер, В.Е. Нікітін.— 2004.— Бюл. № 6.

14. Патент № 5311 РФ. Нагреватель // А.В. Елагин, С.М. Ротнер, В.В. Салтыков.—1997. http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=5311&TypeFile=html

15. Патент № 2772 України. Нагрівач // С.М. Ротнер.— 2004.— Бюл. № 8.

16. Патент № 121573 України. Імітатор теплового потоку / Ю.Є. Ніколаєнко, Р.С. Мельник, О.І. Руденко, С.М. Ротнер.— 2017.— Бюл. № 23. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/21497>

17. Николаенко Ю.Е., Козак Д.В. Термическое сопротивление алюминиевой гравитационной тепловой трубы с резьбовой капиллярной структурой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2017.— № 4-5.— С. 24—31. <https://doi.org/10.15222/TKEA2017.4-5.24>.